

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΟΛΥΠΛΟΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ*

Του Δρ. ΓΙΩΡΓΟΥ Χ. ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ
Εθνική Τράπεζα Επενδύσεων Βιομηχανικής Αναπτύξεως Α.Ε. και
Ανωτάτη Σχολή Οικονομικών και Εμπορικών Επιστημών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αναπαράσταση ενός συστήματος με ένα μοντέλο προσομοίωσης συχνά απαιτεί, στην πράξη, την κατασκευή ενός μεγάλου και πολύπλοκου μοντέλου. Το γεγονός αυτό δημιουργεί δύο κύριες δυσκολίες : Ένα μεγάλο μοντέλο μπορεί να ξεπεράσει τις δυνατότητες του υπολογιστή, τόσο από πλευράς μνήμης, όσο και διαθέσιμου χρόνου. Παράλληλα, η ανάγκη αναπαράστασης πολύπλοκων σχέσεων που παρατηρούνται στο σύστημα δυσχεραίνει σοβαρά τη διαδικασία κατασκευής του μοντέλου και πολλαπλασιάζει την πιθανότητα λαθών.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται δύο μέθοδοι κατασκευής μοντέλων που, ανάλογα με τις ιδιομορφίες του συστήματος, στοχεύουν στην αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων. Κεντρική ιδέα των δύο μεθόδων αποτελεί η διάσπαση του συνολικού μοντέλου σε μικρότερα υπομοντέλα που μπορούν να προσομοιωθούν σχεδόν ανεξάρτητα μεταξύ τους. Με τον τρόπο αυτό διευκολύνεται η επίλυση προβλημάτων σχετικών με τη χωρητικότητα και το διαθέσιμο χρόνο του υπολογιστή και απλοποιείται η διαδικασία κατασκευής του μοντέλου.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από τα πρώτα στάδια ανάπτυξης της προσομοίωσης η ερευνητική προσπάθεια στο χώρο κατασκευής του μοντέλου εντοπίστηκε στη δημιουργία μιας συστηματικής μεθοδολογίας. Παράλληλη σχεδόν ήταν και η ανάπτυξη μέσων

* Το ερευνητικό έργο που περιγράφεται στην εργασία αυτή έγινε στο Department of Operational Research και στο Centre in Simulation του Πανεπιστημίου του Lancaster.

που βοηθούσαν τον αναλυτή ενός συστήματος στην κατασκευή του αντίστοιχου μοντέλου προσομοίωσης¹. Η μεθοδολογία, παρόλο που ποτέ δεν ενοποιήθηκε στα πλαίσια κάποιας θεωρίας, περιλαμβάνει σήμερα ορισμένες κύριες τεχνικές, καθώς και ένα σημαντικό αριθμό από παραλλαγές τους. Η πρώτη χρονικά τεχνική κατασκευής μοντέλου, που παρουσιάστηκε από τον Tocher, είναι η μέθοδος των «3 - φάσεων» (3-phase approach).

Ακολούθησαν ή μέθοδος των δραστηριοτήτων (activity approach) και η μέθοδος των γεγονότων (event approach)², ενώ σχετικά νεότερη είναι η μέθοδος των διαδικασιών (proceses ή process interaction approach).³ Οι τέσσερις αυτές κύριες τεχνικές, που παρουσιάζουν ορισμένες συγγένειες μεταξύ τους, αποτέλεσαν την βάση για την εμφάνιση σημαντικού αριθμού παραλλαγών τους ή μεθόδων που αποτελούν κάποιο συνδυασμό των πρώτων.

Οι προσπάθειες για τη δημιουργία μέσων που θα διευκόλυναν την εφαρμογή κάποιας τεχνικής προσομοίωσης για την κατασκευή ενός συγκεκριμένου μοντέλου κατέληξαν στη δημιουργία των «γλωσσών προσομοίωσης». Οι γλώσσες προσομοίωσης είναι έτοιμα προγράμματα ηλεκτρονικού υπολογιστή (packages), που εκτελούν ορισμένες λειτουργίες, που είναι κοινές σε κάθε μοντέλο προσομοίωσης (π.χ.' προσάυξηση χρόνου, συλλογή στατιστικών δεδομένων κ.λ.π.). Η κύρια χρησιμότητα των επιτυχημένων γλωσσών προσομοίωσης, εκτός από την απαλλαγή του αναλυτή από τον εξαρχής προγραμματισμό των παραπάνω στοιχειωδών λειτουργιών, είναι η παροχή ενός πλαισίου για τη μεθοδική ανάλυση του συστήματος που θα προσομοιωθεί και τη συστηματική κατασκευή του μοντέλου.

Η ανάπτυξη των γλωσσών προσομοίωσης⁴ συνέβαλε σημαντικά στη διάδοση της προσομοίωσης ως τεχνικής μελέτης και επίλυσης σύνθετων προβλημάτων. Όσο όμως το μέγεθος ή ο βαθμός λεπτομέρειας ενός μοντέλου αυξάνουν, δημιουργούνται σοβαρές δυσκολίες στη διαδικασία κατασκευής του. Παράλληλα, ένα μεγάλο μοντέλο μπορεί να ξεπεράσει τις δυνατότητες του υπολογιστή που χρησιμοποιείται από πλευράς μνήμης ή και διαθέσιμου χρόνου. Ο τελευταίος, ιδιαίτερα, παράγοντας συχνά μπορεί να αποβεί καθοριστικός για την έκταση του πειραματισμού με ένα μοντέλο προσομοίωσης που είναι απαραίτητος για την εξεύρεση μιας ικανοποιητικής λύσης. Στην αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων αποσκοπούν οι δύο τεχνικές προσομοίωσης συστημάτων, που θα παρουσιάσουμε. Η μέθοδος της Κελικής Προσομοίωσης, (Cellular Simulation) και η μέθοδος της Προσομοίωσης Σπάνιων Γεγονότων (Simulation of Rare Events). Και οι δύο αυτές μέθοδοι στηρίζονται στη διάσπαση του αρχικού μοντέλου σε μικρότερα υπομοντέλα, που μπορούν να θεωρηθούν σαν ξεχωριστά μοντέλα και

να προσομοιωθούν χωριστά, αφού βέβαια καθορισθούν ορισμένοι κανόνες που διέπουν τις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις. Με τον τρόπο αυτό, οι πολύπλοκες σχέσεις που πιθανόν συνυπάρχουν στο αρχικό μοντέλο, διασπώνται σε μικρότερα υποσύνολα και ο χειρισμός τους είναι ευκολότερος. Παράλληλα, κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων προσομοίωσης, ορισμένα υπομοντέλα που δεν υφίστανται αλλαγές κατά τον πειραματισμό αποτελούν «το περιβάλλον» ή τη βάση για την προσομοίωση των υπολοίπων. Όπως θα περιγραφεί στη συνέχεια, η προσομοίωση της πρώτης ομάδας των υπομοντέλων, δεν είναι απαραίτητη σε κάθε επανάληψη του πειράματος. Το μέγεθος επομένως του μοντέλου που προσομοιώνεται μπορεί να μειώνεται σημαντικά (ανάλογα με τον αριθμό των υπομοντέλων που δεν προσομοιώνονται) με αποτέλεσμα τη δυνατότητα σημαντικής εξοικονόμησης χρόνου διάρκειας του πειράματος.

ΟΡΟΛΟΓΙΑ

Επειδή η ορολογία στη βιβλιογραφία της προσομοίωσης δεν είναι κατασταλαγμένη και συχνά ο ίδιος όρος χρησιμοποιείται για να δηλώσει διαφορετικές έννοιες, είναι σκόπιμη η διευκρίνιση των όρων που χρησιμοποιούνται στη συνέχεια.

Κάθε σύστημα που προσομοιώνεται θεωρείται ότι αποτελείται από στοιχεία (Entities). Τα στοιχεία ενός συστήματος μπορούν, ανάλογα με τις απαιτήσεις της προσομοίωσης, να ομαδοποιηθούν σε κατηγορίες (classes). Τα στοιχεία μιας ορισμένης κατηγορίας, παρόλο που δεν είναι αναγκαστικά πανομοιότυπα, ακολουθούν συνήθως παρόμοιους τρόπους συμπεριφοράς.

Παράδειγμα κατηγοριών στοιχείου στην προσομοίωση ενός super - market είναι οι πελάτες ή τα ταμεία. Τα αντίστοιχα στοιχεία της κατηγορίας «πελάτες» είναι ο πελάτης Α, ο πελάτης Β, κ.ο.κ. Διακρίνονται ακόμα δύο γενικότεροι τύποι στοιχείων ή και κατηγοριών στοιχείων : μόνιμα στοιχεία (permanent entities) και κατηγορίες μόνιμων στοιχείων, και προσωρινά στοιχεία (temporary entities) και κατηγορίες προσωρινών στοιχείων. Τα μόνιμα στοιχεία παραμένουν στο σύστημα σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης (π.χ. τα ταμεία), ενώ τα προσωρινά για ορισμένο μόνο διάστημα (π.χ. ο πελάτης Κ, που έρχεται ψωνίζει και φεύγει).

Τα στοιχεία του συστήματος, κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, είτε θα εκτελούν κάποια λειτουργία, είτε θα είναι αδρανής, περιμένοντας να εμπλακούν σε κάποια δραστηριότητα (activity). Στη δεύτερη αυτή περίπτωση θα βρίσκονται σε κάποιο σημείο αναμονής ή ουρά (queue). Δραστηριότητα είναι

μιά ενεργής κατάσταση στην οποία βρίσκεται κάποιο στοιχείο του συστήματος ή περισσότερα στοιχεία σε συνεργασία μεταξύ τους. Κάθε δραστηριότητα έχει μια χρονική διάρκεια που μπορεί να προσδιοριστεί συνήθως χρησιμοποιώντας κάποιο απλό μαθηματικό μοντέλο (π.χ. κατανομή πιθανότητας).

Το τέλος κάθε δραστηριότητας προσδιορίζεται συνήθως από ένα γεγονός (event). Το γεγονός προσδιορίζει επίσης και κάθε άλλη στιγμιαία (δηλ. χωρίς χρονική διάρκεια) αλλαγή στην κατάσταση του συστήματος (π.χ. άφιξη νέου πελάτη στο super - market). Η κατάσταση του συστήματος σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή καθορίζεται από : α) Την κατάσταση που βρίσκονται τα στοιχεία του (αδρανή ή ενεργά σε κάποια δραστηριότητα), β) τις δραστηριότητες που βρίσκονται σε εξέλιξη και γ) τα γεγονότα που τυχόν συμβαίνουν τη συγκεκριμένη στιγμή.

ΚΕΛΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Κεντρική ιδέα της κελικής προσομοίωσης είναι η διάσπαση ενός συνολικού μοντέλου, που αναπαριστά ολόκληρο το σύστημα που προσομοιώνεται, σε μικρότερα υπομοντέλα, που ονομάζονται κελιά (cells).

Η ομαδοποίηση αυτή των δραστηριοτήτων γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε η εκτέλεση οποιασδήποτε δραστηριότητας ή γεγονότος σε κάποιο κελί, να είναι ανεξάρτητη από την κατάσταση στην οποία βρίσκονται τα άλλα κελιά τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

Η έννοια ενός μοντέλου κελικής προσομοίωσης επεξηγείται με το παρακάτω απλό παράδειγμα. Έστω ότι το σύστημα που προσομοιώνεται είναι ένα τμήμα κάποιου εργοστασίου, όπου βρίσκονται 3 μηχανές που εκτελούν την ίδια ακριβώς κατεργασία. Τα προϊόντα, καθώς φθάνουν στο σύστημα, εκχωρούνται διαδοχικά σε μια μηχανή (π.χ. το πρώτο στη μηχανή Α, το δεύτερο στη Β, το τρίτο στη Γ, το τέταρτο πάλι στη Α κ.ο.κ.). Αφού εκχωρηθεί σε κάποια μηχανή ένα προϊόν είτε αρχίζει άμεσα την κατεργασία του, αν η μηχανή δεν είναι απασχολημένη, είτε περιμένει να τελειώσει η κατεργασία του προηγούμενου προϊόντος. Οι δραστηριότητες του συστήματος αυτού είναι οι εξής : 1) Άφιξη προϊόντος στο σύστημα, 2) εκχώρηση του σε μηχανή, 3) κατεργασία στη μηχανή Α, 4) κατεργασία στη μηχανή Β, 5) κατεργασία στη μηχανή Γ. Σε ένα μοντέλο κελικής προσομοίωσης η ομαδοποίηση των παραπάνω δραστηριοτήτων θα γίνονταν σε 4 κελιά, ως εξής : Κελί 1 : Άφιξη προϊόντος, εκχώρηση σε μηχανή. Κελί 2 : Κατεργασία στην Α. Κελί 3 : κατεργασία στη Β. Κελί 4 : Κατεργασία στη Γ. Σημειώνεται ότι η ομαδοποίηση αυτή είναι δυνατή επειδή η εκχώρηση προϊόν-

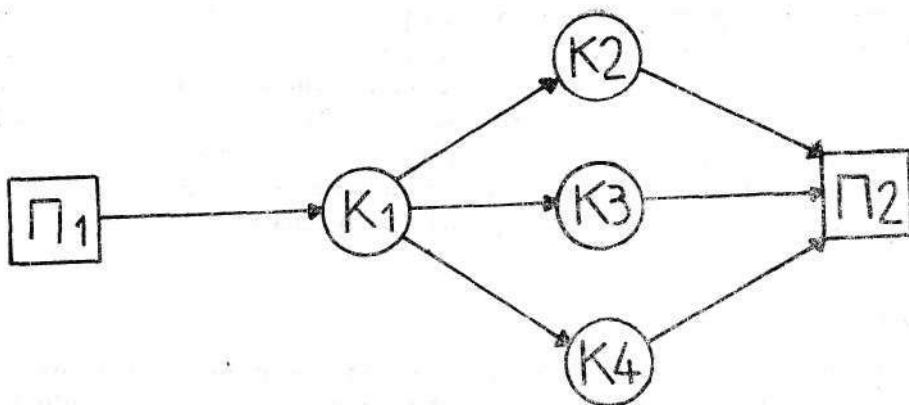
των στις μηχανές γίνεται με προκαθορισμένη σειρά και χωρίς να εξετάζεται ο αριθμός των προϊόντων που περιμένουν για κατεργασία σε κάθε μηχανή. Αν γίνονταν κάτι τέτοιο, τότε η δραστηριότητα «εκχώρηση» θα εξαρτιόταν από την κατάσταση των κελιών 2,3 και 4 και επομένως δε θα μπορούσε να τοποθετηθεί σε ξεχωριστό κελί. Στην περίπτωση αυτή ολόκληρο το μοντέλο θα αποτελείτο από ένα και μόνο κελί, όπου θα περιλαμβάνονταν όλες οι δραστηριότητες, όπως δηλαδή θα γινόταν σε ένα κλασσικό μοντέλο προσομοίωσης.

Πειραματικά πλεονεκτήματα

Το χαρακτηριστικό της προσομοίωσης που τη διαφοροποιεί από τις αναλυτικές τεχνικές της επιχειρησιακής έρευνας είναι το ότι πρόκειται για μέθοδο πειραματική. Ένα μοντέλο προσομοίωσης «δεν λύνεται», ώστε να δώσει την άριστη λύση, αλλά χρησιμοποιείται επαναληπτικά για την αξιολόγηση διαφόρων εναλλακτικών λύσεων, μέχρι να βρεθεί κάποια ικανοποιητική λύση στο πρόβλημα που μελετάται. Ο πειραματισμός λοιπόν αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι κάθε προβλήματος προσομοίωσης και, στην πράξη κατά κανόνα, ο χρόνος που αφιερώνεται στο στάδιο αυτό είναι, ή τουλάχιστο πρέπει να είναι, πολύ μεγαλύτερος από εκείνον που απαιτείται για την κατασκευή του μοντέλου. Η αναζήτηση μιας ικανοποιητικής λύσης γίνεται κάνοντας κάποιες αλλαγές στο αρχικό μοντέλλο και ξαναβάζοντας το σε λειτουργία, για να εκτιμηθούν οι συνέπειες των αλλαγών στη συμπεριφορά του συστήματος. Οι αλλαγές αυτές πρέπει να γίνονται με συστηματικό τρόπο, ώστε να μη γίνονται άσκοπες επαναλήψεις του πειράματος, ενώ παράλληλα, συμπεράσματα και πληροφορίες, που προκύπτουν από τις πρώτες επαναλήψεις να χρησιμοποιούνται, όσο είναι δυνατό, στις επόμενες με σκοπό την εξοικονόμηση χρόνου και τη διεύρυνση του φάσματος των λύσεων που εξετάζονται. Ένα μοντέλο κελικής προσομοίωσης αξιοποιεί, όπως θα δούμε στη συνέχεια, τις πληροφορίες που προκύπτουν στις διαδοχικές επαναλήψεις του πειράματος, μειώνοντας σημαντικά το συνολικό χρόνο πειραματισμού.

Θα εξετάσουμε τα πειραματικά πλεονεκτήματα της κελικής προσομοίωσης με το απλό σύστημα του εργοστασίου της προηγούμενης ενότητας. Σχηματικά, το κελικό μοντέλο του συστήματος αυτού έχει ως εξής :

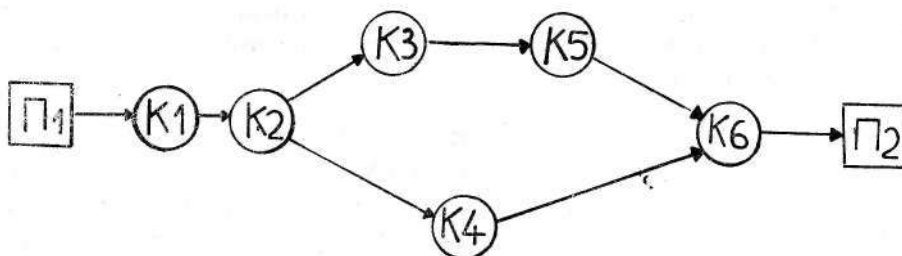
Οι κύκλοι K1, . . . , K4 παριστάνουν τα κελιά του συστήματος και τα τετράγωνα Π1 και Π2 το περιβάλλον του συστήματος (π.χ. τα υπόλοιπα τμήματα του εργοστασίου). Έστω ότι ο σκοπός της προσομοίωσης είναι η εκτίμηση του αριθμού των προϊόντων που τελειώνουν την κατεργασία τους ανά μονάδα χρόνου. Έστω ακόμα ότι πρέπει να μελετηθούν πιθανές αλλαγές στον χρόνο κατεργασίας στη μηχανή Β για την εξάλειψη της συσσώρευσης προϊόντων που παρατηρείται.



Πρόκειται συγκεκριμένα να μελετηθεί ο βαθμός που πρέπει να συμπιεσθεί η διάρκεια κατεργασίας, ώστε να εξαλειφθεί το φαινόμενο. Θα πρέπει, επομένως, να γίνουν διαδοχικές προσομοιώσεις του συστήματος χρησιμοποιώντας διαφορετικούς χρόνους κατεργασίας σε κάθε επανάληψη, μέχρι να βρεθεί μια ικανοποιητική λύση. Χρησιμοποιώντας σε κάθε επανάληψη τις ίδιες αρχικές συνθήκες και την ίδια σειρά τυχαίων αριθμών, δηλαδή μια αρκετά συνηθισμένη τακτική στο σχεδιασμό πειραμάτων προσομοίωσης⁵, παρατηρούνται τα εξής: Από τα κελιά 1, 2 και 4 θα περάσει ο ίδιος αριθμός προϊόντων και μάλιστα στις ίδιες χρονικές στιγμές, όπως στη πρώτη επανάληψη του πειράματος. Αντίθετα, η ροή προϊόντων θα αλλάξει μόνο στο κελί 3. Στην περίπτωση αυτή η συλλογή στοιχείων για τη συμπεριφορά του κελιού 3 μπορεί να γίνει ανεξάρτητα, χωρίς δηλαδή να απαιτείται παράλληλη επανάληψη της προσομοίωσης των κελιών 2 και 4. Ακόμα, αν κατά την πρώτη επανάληψη του πειράματος καταγραφούν οι χρονικές στιγμές που προϊόντα φεύγουν από το κελί 1 με κατεύθυνση το κελί 3, τότε σε κάθε διαδοχική επανάληψη, δεν θα είναι απαραίτητη η επανάληψη της προσομοίωσης και του κελιού 1. Η προσομοίωση δηλαδή του κελιού 3, μπορεί να γίνει ξεχωριστά, χρησιμοποιώντας σαν εισροή τα δεδομένα που καταγράφηκαν στην πρώτη επανάληψη, και όχι το ίδιο το υπομοντέλο του κελιού 1. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται σημαντική εξοικονόμηση χρόνου, αφού η προσομοίωση ολόκληρου του συστήματος ουσιαστικά αντικαθίσταται από την προσομοίωση ενός μόνο κελιού.

Έστω τώρα ότι κάποια μεταβολή γίνεται στο κελί 1 (π.χ. αλλαγή του ρυθμού άφιξης προϊόντων στο σύστημα). Στην περίπτωση αυτή αλλάζουν και οι 3 εκροές από το κελί αυτό, προς τα κελιά 2, 3 και 4, ακόμα και αν χρησιμοποιηθούν οι ίδιες αρχικές συνθήκες και οι ίδιοι τυχαίοι αριθμοί. Τώρα λοιπόν είναι απαραίτητο να επαναληφθεί η προσομοίωση ολόκληρου του συστήματος.

Σε περισσότερο πολύπλοκα συστήματα, οι ωφέλειες από την εφαρμογή της κελικής προσομοίωσης μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερες. Έστω το παρακάτω κελικό μοντέλο :



Στην περίπτωση αυτή, μια μεταβολή στο κελί 6 δεν θα απαιτούσε επανάληψη της προσομοίωσης των κελιών 1 - 5, αν έχουν καταγραφεί οι εκροές των κελιών 4 και 5. Μια αλλαγή στο κελί 4 θα απαιτούσε προσομοίωση μόνο των κελιών 4 και 6, ενώ μια αλλαγή στο κελί 1 θα απαιτούσε προσομοίωση ολόκληρου του συστήματος. Γενικά, μια μεταβολή σε κάποιο κελί απαιτεί την προσομοίωση όλων των κελιών που άμεσα, ή έμμεσα παίρνουν εισροές από το πρώτο. Αν επομένως πρόκειται να μελετηθεί σειρά από αλλαγές σε διάφορα κελιά, είναι σκόπιμο να γίνονται πρώτα οι μεταβολές στα κελιά που δίνουν, άμεσα ή έμμεσα, τις λιγότερες εκροές. Στο παραπάνω παράδειγμα, δηλαδή, οι αλλαγές πρέπει να γίνουν με την εξής σειρά :

Στάδιο 1 : κελί 6

- » 2 : κελιά 4 και 5
- » 3 : κελί 3
- » 4 : » 2
- » 5 : » 1

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι, σε μια σειρά από υποθετικά συστήματα που προσομοιώθηκαν με την παραπάνω μέθοδο, η εξοικονόμηση χρόνου υπολογιστή που επιτυγχανόταν κατά τον πειραματισμό με μοντέλα κελικής προσομοίωσης, σε σύγκριση με αντίστοιχα συμβατικά μοντέλα, ξεκινούσε από 20% και έφθανε στο 58%, ανάλογα με το είδος του μοντέλου και τον τύπο του πειράματος⁶.

Πέρα από τα πειραματικά πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω η δομή που επιβάλλει στο μοντέλο η μέθοδος της κελικής προσομοίωσης, μπορεί να διευκολύνει σημαντικά την κατασκευή μοντέλων για μεγάλα και πολύπλοκα συστήματα. Συγκεκριμένα το μοντέλο κάθε κελιού κατασκευάζεται ξεχωριστά-

μπορεί ακόμα να κατασκευαστεί και από διαφορετικούς ανθρώπους, αν καθορισθούν προηγουμένως οι αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στα κελιά-και έτσι απλοποιείται η διαδικασία τόσο της συγγραφής όσο και της διόρθωσης του προγράμματος του υπολογιστή. Ακόμα, για πολύ μεγάλα μοντέλα, που πιθανόν να ξεπερνούν τις δυνατότητες μνήμης του διαθέσιμου υπολογιστή, η προσομοίωση του όλου συστήματος μπορεί να γίνει σταδιακά, προσομοιώνοντας ορισμένες ομάδες κελιών κάθε φορά.

Για τη διευκόλυνση της εφαρμογής της κελικής προσομοίωσης έχουν αναπτυχθεί δύο γλώσσες προσομοίωσης, η XLSIM-1 που βασίζεται στη γλώσσα Algo⁷ και η RCSP για μοντέλα σε γλώσσα Fortran⁸. Οι γλώσσες αυτές, πέρα από τις δυνατότητες χρησιμοποίησής τους για την κατασκευή μοντέλων κελικής προσομοίωσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως συμβατικές γλώσσες προσομοίωσης για μη κελικά μοντέλα.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ

Όλες οι τεχνικές προσομοίωσης που παρουσιάστηκαν μέχρι πρόσφατα προορίζονται για συστήματα όπου οι διάφορες δραστηριότητες επαναλαμβάνονται σε χρονικά διαστήματα που δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές από δραστηριότητα σε δραστηριότητα. Έτσι επιλέγοντας κατάλληλα τη μονάδα χρόνου και το συνολικό χρόνο της προσομοίωσης, μέσα στη διάρκεια του τελευταίου, περιλαμβάνονται συνήθως επαρκείς επαναλήψεις κάθε μιας δραστηριότητας, ώστε τα στοιχεία που θα συλλέγουν να οδηγούν σε αξιόπιστα συμπεράσματα.

Στην πράξη όμως συχνά παρουσιάζονται συστήματα όπου τα χρονικά διαστήματα, στα οποία επαναλαμβάνονται ορισμένες δραστηριότητες, είναι πολύ μεγαλύτερα από τα διαστήματα επανάληψης των υπόλοιπων δραστηριοτήτων. Για παράδειγμα, στην προσομοίωση μιας γραμμής παραγωγής, οι συνηθισμένες δραστηριότητες (άφιξη προϊόντων, έναρξη κατεργασίας κ.λ.π.) μπορεί να επαναλαμβάνονται σε διαστήματα δευτερολέπτων ή λεπτών, οπότε είναι σκόπιμο να επιλεγεί και ανάλογη μονάδα χρόνου. Συχνά όμως συνυπάρχουν και δραστηριότητες, όπως π.χ. κάποια σοβαρή βλάβη στο σύστημα ή κάποια διακοπή της λειτουργίας για συντήρηση, που επαναλαμβάνονται σε πολύ μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα, π.χ. εβδομάδες ή μήνες. Αν σκοπός της προσομοίωσης είναι η μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος κατά τη διάρκεια αυτών των περιστατικών, θα πρέπει να προσομοιωθεί ένας σημαντικός αριθμός επαναλήψεων. Αν, ακόμα, τα περιστατικά αυτά ενσωματωθούν στο μοντέλο που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της κανονικής λειτουργίας του συστήματος, τότε ο συνο-

λικός χρόνος που θα απαιτηθεί για τη προσομοίωση αρκετών επαναλήψεων, θα είναι εξαιρετικά μεγάλος.

Έτσι θα ξεπερνά ίσως το διαθέσιμο χρόνο του υπολογιστή, ενώ κάτι τέτοιο είναι πολύ πιθανό να συμβεί, αν η προσομοίωση πρέπει να επαναληφθεί πολλές φορές στα πλαίσια κάποιου πειράματος. Σημειώνεται ακόμα ότι η χρησιμοποίηση μεγαλύτερης μονάδας χρόνου (π.χ. εβδομάδα ή μήνας), ώστε να συντομευθούν οι επαναλήψεις, πολύ συχνά δεν αποτελεί ικανοποιητική λύση. Τη χρονική στιγμή που αρχίζει το σπάνιο γεγονός (π.χ. σοβαρή βλάβη), πρέπει να είναι γνωστή ακριβώς η κατάσταση του συστήματος, γιατί αυτή θα αποτελέσει την αφετηρία της προσομοίωσης της συγκεκριμένης επανάληψης του γεγονότος. Κάτι τέτοιο όμως είναι δυνατό να γίνει μόνο με τη λεπτομερή προσομοίωση της κανονικής λειτουργίας, δηλαδή με τη χρησιμοποίηση ανάλογης χρονικής μονάδας.

Συνοπτική περιγραφή

Κατά την προσομοίωση συστημάτων, όπως αυτά που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, το ενδιαφέρον εντοπίζεται κατά κανόνα στη μελέτη των «σπάνιων γεγονότων», αφού άλλωστε η προσομοίωση της κανονικής λειτουργίας μπορεί να γίνει, χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα, με κάποια από τις συμβατικές μεθόδους. Ως «σπάνιο γεγονός» θεωρείται μια κατάσταση, δηλαδή μια σειρά από δραστηριότητες και γεγονότα, που επαναλαμβάνεται με συχνότητα πολύ μικρότερη από εκείνη των δραστηριοτήτων και των γεγονότων που χαρακτηρίζουν την κανονική λειτουργία του συστήματος.

Κεντρική ιδέα της μεθόδου Προσομοίωσης Σπάνιων Γεγονότων, αποτελεί η παρατήρηση ότι, αφού σκοπός της προσομοίωσης είναι η μελέτη των σπάνιων γεγονότων, είναι σκόπιμο η προσομοίωση των γεγονότων αυτών να γίνεται ξεχωριστά από την προσομοίωση της κανονικής λειτουργίας του συστήματος. Αντικειμενικός σκοπός είναι, επομένως, η κατασκευή ενός μοντέλου που θα προσομοιώνει μόνο εκείνα τα χρονικά διαστήματα, κατά τα οποία ένα σπάνιο γεγονός βρίσκεται σε εξέλιξη, παραλείποντας τα ενδιάμεσα διαστήματα της κανονικής λειτουργίας. Για την προσομοίωση όμως των σπάνιων γεγονότων είναι απαραίτητο, όπως προαναφέρθηκε, να είναι γνωστή η κατάσταση του συστήματος τη στιγμή που αρχίζει το σπάνιο γεγονός.

Στις επόμενες ενότητες, περιγράφεται μια μέθοδος, με την οποία η κατάσταση του συστήματος σε κάποια τυχαία χρονική στιγμή μπορεί να προσδιοριστεί χωρίς να απαιτείται προσομοίωση του διαστήματος που προηγείται. Χρησιμοποιώντας την κατάσταση αυτή μπορεί να ξεκινήσει η προσομοίωση μιας επανάληψης του σπάνιου γεγονότος. Όταν το σπάνιο γεγονός τελειώσει, τότε προσ-

διορίζεται μια νέα τυχαία κατάσταση του συστήματος, που χρησιμοποιείται για μια νέα επανάληψη του γεγονότος κ.Ο.Κ. μέχρι να προσομοιωθεί ο απαιτούμενος αριθμός επαναλήψεως του γεγονότος. Προϋπόθεση βέβαια της μεθόδου αυτής αποτελεί το γεγονός ότι τα σπάνια γεγονότα συμβαίνουν σε τυχαίες χρονικές στιγμές και ανεξάρτητα από την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το σύστημα. Η υπόθεση αυτή ισχύει σε πολλές πρακτικές περιπτώσεις (π.χ. τυχαίες βλάβες κ.λ.π.). Αν όμως τα τυχαία γεγονότα έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης, ή μπορούν να συμβούν μόνο όταν το σύστημα βρίσκεται σε κάποια συγκεκριμένη κατάσταση, η μέθοδος που περιγράφεται στη συνέχεια μπορεί να προσαρμοσθεί κατάλληλα και να εφαρμοσθεί σε ανάλογες περιπτώσεις.⁹

Προσδιορισμός της κατάστασης του συστήματος

Με την προϋπόθεση ότι ένα τυχαίο γεγονός μπορεί να συμβεί οποιαδήποτε χρονική στιγμή, η εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου απαιτεί τη δυνατότητα αναπαραγωγής της κατάστασης του συστήματος σε τυχαίες χρονικές στιγμές ή, με άλλα λόγια, την τυχαία αναπαραγωγή τέτοιων καταστάσεων. Η αναπαραγωγή αυτή επιτυγχάνεται με το συνηθισμένο τρόπο αναπαραστάσης τυχαίων φαινομένων, δηλαδή με παρατήρηση, ανάλυση και δειγματοληπτική αναπαραγωγή ή προσομοίωση.

Συγκεκριμένα, στο στάδιο της παρατήρησης, κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης της κανονικής λειτουργίας, καταγράφεται η κατάσταση του συστήματος σε τακτά διαστήματα φροντίζοντας η χρονική απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικές καταγραφές να είναι αρκετά μεγάλη, ώστε οι διαδοχικές καταστάσεις να είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Στο τέλος της διαδικασίας αυτής έχει καταγραφεί μία σειρά από «τυχαίες καταστάσεις του συστήματος» (snapshots). Με μια μέθοδο που περιγράφεται στη συνέχεια, κάθε μια από τις καταστάσεις αυτές μετασχηματίζεται σε μια ομάδα από αριθμητικές παρατηρήσεις (όπως θα δούμε, οι παρατηρήσεις αυτές αντιστοιχούν στον αριθμό των στοιχείων που βρίσκονται σε καθένα από τα σημεία αναμονής του συστήματος τη στιγμή της καταγραφής). Με τον τρόπο αυτό, οι διαδοχικές καταστάσεις μετασχηματίζονται σε μια ομάδα αριθμητικών σειρών (τόσες σειρές, όσα και τα σημεία αναμονής του συστήματος). Η ομάδα αυτή των σειρών αναλύεται, σε δεύτερο στάδιο, με κάποια κατάλληλη στατιστική μέθοδο και προσδιορίζεται κάποιο μαθηματικό μοντέλο, με το οποίο μπορούν να αναπαραχθούν τέτοιες ομάδες αριθμών. Στο τελευταίο στάδιο, της δειγματοληπτικής αναπαραγωγής, από το σχετικό μοντέλο αναπαράγεται μία ομάδα αριθμών. Αντιστρέφοντας το μετασχηματισμό του πρώτου σταδίου, από

τους αριθμούς αυτούς προκύπτει μια τυχαία κατάσταση του συστήματος, ανάλογη με εκείνες που καταγράφηκαν στο στάδιο αυτό.

Με το δειγματοληπτικό λοιπόν μοντέλο είναι πλέον δυνατό να αναπαραχθούν τυχαίες καταστάσεις του συστήματος. Κάθε μία από τις καταστάσεις αυτές χρησιμοποιείται σαν αφετηρία για την προσομοίωση μιας εμφάνισης του τυχαίου γεγονότος. Η διαδικασία καταγραφής και αναπαραγωγής των καταστάσεων και οι ανάλογοι μετασχηματισμοί περιγράφονται εκτενέστερα στη συνέχεια.

Καταγραφή των καταστάσεων

Όπως προαναφέρθηκε, η κατάσταση του συστήματος σε κάποια χρονική στιγμή της προσομοίωσης περιγράφεται από : α) Τον αριθμό και τον τύπο των στοιχείων που βρίσκονται σε κάθε σημείο αναμονής, β) τον αριθμό και τον τύπο των στοιχείων που απασχολούνται σε κάθε δραστηριότητα που βρίσκεται σε εξέλιξη και γ) την κατάσταση κάθε δραστηριότητας, δηλαδή το χρόνο που έχει περάσει από την αρχή της δραστηριότητας.

Σκοπός είναι η ποσοτικοποίηση μιας τέτοιας κατάστασης με μια ομάδα αριθμών. Μπορούν να επινοηθούν διάφοροι τρόποι για, να επιτευχθεί αυτό το αποτέλεσμα. Ένας συστηματικός τρόπος είναι ο εξής : Θέτουμε τον περιορισμό ότι τα στοιχεία που βρίσκονται σε κάθε συγκεκριμένο σημείο αναμονής ανήκουν στην ίδια κατηγορία (η υπόθεση αυτή δεν είναι περιοριστική γιατί αν υπάρχουν στοιχεία διαφορετικού τύπου, αυτά μπορούν να τοποθετούνται σε παράλληλα σημεία αναμονής, πριν από κάθε δραστηριότητα). Έστω τώρα, ότι, κατά τη στιγμή της καταγραφής, όσα στοιχεία βρίσκονται απασχολημένα σε κάποια δραστηριότητα επιστρέφουν στα σημεία αναμονής, από τα οποία ξεκίνησαν πριν αρχίσει η αντίστοιχη δραστηριότητα. Αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι μια υποθετική κατάσταση του συστήματος, κατά την οποία στα σημεία αναμονής βρίσκονται ορισμένα στοιχεία και καμμιά δραστηριότητα δεν βρίσκεται σε εξέλιξη. Η κατάσταση αυτή περιγράφεται πλήρως από τον αριθμό των στοιχείων που βρίσκονται σε κάθε σημείο αναμονής, ή με άλλα λόγια από μία ομάδα αριθμών. Η διαδικασία αυτή ισοδυναμεί με μια χρονική αντιστροφή κάθε μιας δραστηριότητας σε εξέλιξη, κατά κάποιο χρονικό διάστημα, διαφορετικό για κάθε δραστηριότητα. Παράλληλα λοιπόν με την επιστροφή των στοιχείων στα σημεία αναμονής καταγράφεται και το διάστημα που αντιστράφηκε κάθε δραστηριότητα ή, τελείως ισοδύναμα, το διάστημα που απομένει μέχρι το τέλος της. Οι χρόνοι αυτοί καταγράφονται σε όλες τις διαδοχικές αντιστροφές κάθε δραστηριότητας και για κάθε δραστηριότητα σχηματίζεται μια κατανομή συχνοτήτων των αντίστοιχων χρόνων.

. Για την αναπαραγωγή των καταστάσεων του συστήματος, όπως θα δούμε στις επόμενες ενότητες, η παραπάνω διαδικασία αντιστρέφεται. Συγκεκριμένα, αφού αναπαραχθεί μια υποθετική κατάσταση, με όλα τα στοιχεία του συστήματος να βρίσκονται στα σημεία αναμονής, ξεκινούν και πάλι οι δραστηριότητες, και μάλιστα το τέλος τους προγραμματίζεται για χρονικό διάστημα ανάλογο με εκείνο που είχε απομείνει τη στιγμή της καταγραφής.

Ανάλυση των καταστάσεων

Μετά την χρονική αντιστροφή των δραστηριοτήτων, κάθε κατάσταση του συστήματος περιγράφεται από μια σειρά αριθμών που αντιστοιχούν στον αριθμό των στοιχείων που βρίσκονται σε κάθε σημείο αναμονής του μοντέλου. Οι παρατηρήσεις σε μια συγκεκριμένη κατάσταση παρουσιάζουν συνήθως διασυσχέτιση (cross correlation) μεταξύ τους, γιατί ο αριθμός των στοιχείων που βρίσκονται σε κάποιο σημείο αναμονής την ορισμένη στιγμή συχνά σχετίζεται με τον αριθμό των στοιχείων που βρίσκονται σε γειτονικά τουλάχιστον σημεία την ίδια στιγμή. Οι παρατηρήσεις για το ίδιο σημείο αναμονής σε διαδοχικές καταστάσεις δεν πρέπει να παρουσιάζουν σειριακή συσχέτιση (serial correlation), αφού, όπως προαναφέρθηκε, ανάμεσα σε διαδοχικές καταστάσεις πρέπει να μεσολαβεί αρκετό χρονικό διάστημα, ώστε οι καταστάσεις να είναι ανεξάρτητες. Το σύνολο λοιπόν των διαδοχικών καταστάσεων, σχηματίζει ουσιαστικά μία ομάδα διασυσχετιζόμενες σειρές παρατηρήσεων που όμως δεν παρουσιάζουν σειριακή συσχέτιση. Οι σειρές αυτές μπορούν να αναλυθούν και να αναπαραχθούν με κάποιο πολυμεταβλητό στατιστικό μοντέλο. Ορισμένες μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό αναφέρονται στη βιβλιογραφία⁹.

Αναπαραγωγή των καταστάσεων

Μια χρονικά αντιστραμμένη κατάσταση - με όλα τα στοιχεία στα σημεία αναμονής και χωρίς δραστηριότητες σε εξέλιξη - είναι μια υποθετική κατάσταση, που πολύ σπάνια μπορεί να συμβεί στη διάρκεια μιας προσομοίωσης. Από μια τέτοια όμως κατάσταση είναι δυνατό να αναπαραχθεί μια συνηθισμένη τυχαία κατάσταση αντιστρέφοντας τη διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά την καταγραφή των καταστάσεων.

Μετά τη δειγματοληπτική αναπαραγωγή από το στατιστικό μοντέλο μιας αντιστραμμένης κατάστασης, η διαδικασία μετατροπής της στην αντίστοιχη συμβατική κατάσταση είναι η εξής :

Εξετάζονται διαδοχικά όλες οι δραστηριότητες του συστήματος για να δια-

πιστωθεί ποιες από αυτές μπορούν να ξεκινήσουν κάτω από τις συγκεκριμένες συνθήκες. Με άλλα λόγια, εξετάζεται αν στα σημεία αναμονής από τα οποία τροφοδοτείται κάθε δραστηριότητα, υπάρχει επαρκής αριθμός στοιχείων για την εκτέλεση της δραστηριότητας. Για όσες δραστηριότητες μπορούν να αρχίσουν, τα αντίστοιχα στοιχεία μετακινούνται από τα σημεία αναμονής και εμπλέκονται στη δραστηριότητα. Επίσης, για κάθε δραστηριότητα που αρχίζει, προσδιορίζεται και ο χρόνος που απομένει μέχρι το τέλος του συγκεκριμένου κύκλου της. Ο χρόνος αυτός προσδιορίζεται δειγματοληπτικά από την κατανομή συχνοτήτων με τους χρόνους που απέμεναν μέχρι το τέλος της αντίστοιχης δραστηριότητας, που σχηματίστηκε κατά τις διαδοχικές χρονικές αντιστροφές της δραστηριότητας στο στάδιο της καταγραφής.

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας αυτής για όλες τις δραστηριότητες, έχουμε στη διάθεση μας μια τυχαία κατάσταση του συστήματος, με συμβατικούς όρους, στην οποία μπορεί να βασιστεί η προσομοίωση μιας εμφάνισης του σπάνιου γεγονότος. Όταν η προσομοίωση της συγκεκριμένης επανάληψης του σπάνιου γεγονότος ολοκληρωθεί, μια νέα αντιστραμμένη κατάσταση παράγεται από το στατιστικό μοντέλο, μετατρέπεται στην αντίστοιχη συμβατική κατάσταση του συστήματος και χρησιμοποιείται για την προσομοίωση μιας νέας επανάληψης του σπάνιου γεγονότος. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να προσομοιωθεί ο αριθμός των επαναλήψεων του σπάνιου γεγονότος που απαιτείται.

Πειραματικά αποτελέσματα

Η μέθοδος Προσομοίωσης Σπάνιων Γεγονότων εφαρμόστηκε πειραματικά στην προσομοίωση διαφόρων συστημάτων, στα οποία συνέβαιναν σπάνια γεγονότα, και σε κάθε περίπτωση συγκρίθηκε με την αντίστοιχη συμβατική μέθοδο προσομοίωσης. Σκοπός των συγκρίσεων αυτών ήταν : α) Να επιβεβαιωθεί πειραματικά η λογική ισοδυναμία των δύο μεθόδων, δηλαδή ότι κάτω από τις ίδιες προϋποθέσεις, δίνουν στατιστικά τις ίδιες εκτιμήσεις, και β) να διαπιστωθεί η εξοικονόμηση χρόνου υπολογιστή που επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση της νέας μεθόδου. Η εφαρμογή της μεθόδου σε ένα από τα συστήματα που προσομοιώθηκαν - μια γραμμή παραγωγής - περιγράφεται συνοπτικά στη συνέχεια.

Η γραμμή αποτελείται από 3 σταθμούς Α, Β και Γ. Κάθε σταθμός έχει 3 μηχανήματα, που καθένα τους εκτελεί την ίδια κατεργασία. Τα προϊόντα φθάνουν στο σύστημα με ρυθμό 4 προϊόντα/λεπτό και υφίστανται διαδοχικά κατεργασία σε ένα από τα μηχανήματα κάθε σταθμού. Κατά διαστήματα ένα από τα μηχανήματα του σταθμού Β παθαίνει μια βλάβη, που η επιδιόρθωση της διαρκεί 10 λεπτά. Στην διάρκεια της βλάβης, οι χρόνοι κατεργασίας στα υπόλοιπα δύο μηχανήματα του σταθμού συντομεύονται, ώστε να αποφεύγεται κατά το δυνατό η δημιουργία με-

γάλης συσσώρευσης προϊόντων. Ο αριθμός των προϊόντων που τελειώνουν την κατεργασία τους στο χρονικό διάστημα που διαρκεί η βλάβη καταγράφεται και εκτιμάται η μέση τιμή του για μια σειρά βλαβών. Το σύστημα αυτό προσομοιώνεται 25 φορές και σε κάθε προσομοίωση εκτιμάται ο μέσος \bar{X} , και η τυπική απόσταση S_x , του αριθμού των προϊόντων που τελειώνουν κατεργασία στο διάστημα της βλάβης. Στο τέλος των 25 προσομοιώσεων εκτιμάται ο γενικός μέσος

$$\bar{X} = \frac{1}{25} \sum \bar{X}_i \quad \text{και η τυπική απόκλιση} \quad S_{\bar{X}} = \left[\frac{\sum (\bar{X}_i - \bar{X})^2}{25} \right]^{1/2}$$

Στις προσομοιώσεις που γίνονται με τη συμβατική μέθοδο, οι διαδοχικές βλάβες συμβαίνουν σε διαστήματα 80' - 120' μεταξύ τους. (Σε ένα πραγματικό σύστημα τα διαστήματα αυτά πιθανόν να είναι πολύ μεγαλύτερα, οπότε η εξοικονόμηση χρόνου υπολογιστή που επιτυγχάνεται με τη νέα μέθοδο είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή που αναφέρεται παρακάτω). Στις προσομοιώσεις που γίνονται με τη μέθοδο των σπάνιων γεγονότων, οι βλάβες προσομοιώνονται ξεχωριστά, παραλείποντας δηλαδή τα ενδιάμεσα διαστήματα κανονικής λειτουργίας του συστήματος. Στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται ενδεικτικά 6 από τις 25 εκτιμήσεις του \bar{X} που προέκυψαν από τη συμβατική προσομοίωση και ο αντίστοιχος \bar{X} , καθώς και οι ανάλογες εκτιμήσεις με τη μέθοδο των σπάνιων γεγονότων

	Συμβατική μέθοδος προσομοίωσης						Μέθοδος σπάνιων γεγονότων					
i	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
\bar{X}_i	36,32	36,36	36,90	36,17	36,41	36,74	36,16	36,80	36,01	36,42	36,79	36,40
$S_{\bar{X}}$	3,15	3,29	2,89	2,91	3,22	3,20	3,03	2,74	3,32	2,89	3,13	2,89
	Γενικός μέσος \bar{X} : 36,24						Γενικός μέσος \bar{X} : 36,30					
	Τυπική απόκλιση $S_{\bar{X}}$: 0,27						Τυπική απόκλιση $S_{\bar{X}}$: 0,25					
	Χρόνος CPU : 3013,33"						Χρόνος CPU : 290,34"					

Στη μέθοδο των σπάνιων γεγονότων διατέθηκε ακόμη χρόνος CPU 105.18' για τη διαδικασία καταγραφής, ανάλυσης και αναπαραγωγής των καταστάσεων. Οι καταστάσεις όμως αυτές χρησιμοποιήθηκαν για σειρά επαναλήψεων της προσομοίωσης, όπου αλλαγές γίνονταν μόνο στο μοντέλο προσομοίωσης των βλαβών, ενώ το μοντέλο της κανονικής λειτουργίας του συστήματος παρέμενε αμετάβλητο. Αν βέβαια στη διάρκεια του πειράματος κριθεί αναγκαίο να γίνουν αλλαγές και στην διαδικασία κανονικής λειτουργίας του συστήματος, τότε η καταγραφή, ανάλυση και αναπαραγωγή των καταστάσεων θα πρέπει να επανα-

ληφθεί. Και πάλι όμως οι νέες καταστάσεις θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πολλές επαναλήψεις της προσομοίωσης των βλαβών.

Η προσομοίωση του παραπάνω συστήματος επαναλήφθηκε πολλές φορές, αλλάζοντας, σε πρώτη φάση, παραμέτρους του μοντέλου προσομοίωσης των βλαβών και, σε δεύτερη φάση, κάνοντας αλλαγές και στη διαδικασία κανονικής λειτουργίας. Οι αντίστοιχες εκτιμήσεις από την εφαρμογή των δύο μεθόδων ήταν πάντοτε στατιστικά οι ίδιες σε επίπεδο $\alpha = 5\%$. Η εξοικονόμηση χρόνου CPU που επιτυγχάνονταν με τη μέθοδο των σπάνιων γεγονότων, ήταν της τάξης του 1 : 10 σε κάθε περίπτωση.

Π Ε Ρ Ι Λ Η Ψ Η

Οι δύο μέθοδοι προσομοίωσης που παρουσιάζονται στην εργασία αυτή στοχεύουν α) στην διευκόλυνση του πειραματισμού, που στην πράξη αποτελεί την πλέον χρονοβόρα διαδικασία της όλης μελέτης ενός συστήματος, με τη μέθοδο της προσομοίωσης και β) στη σχετική απλοποίηση της κατασκευής μοντέλων προσομοίωσης για πολύπλοκα συστήματα. Ποσοτικές ενδείξεις για τα πλεονεκτήματα των δύο μεθόδων σχετικά με τον πρώτο στόχο αναφέρθηκαν στα προηγούμενα. Οι δυνατότητες των μεθόδων ως προς το δεύτερο στόχο τους είναι περισσότερο ποιοτικές (κατασκευές δομημένων προγραμμάτων για τα αντίστοιχα μοντέλα, ευκολία στη διόρθωση κ.λ.π.) είναι όμως εξίσου σημαντικές, ιδιαίτερα όταν οι μέθοδοι εφαρμόζονται σε συνάρτηση με τις γλώσσες προσομοίωσης XLSIM- 1 και RCSP που έχουν δημιουργηθεί για αυτό το σκοπό.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. K. D. Tocher and D.G. Owen : The Automatic Programming of Simulations, Proceedings of the 2nd International Conference on O.R., 1960,50.
2. J.G. Laski : On Time Structure in (Monte Carlo) Simulations, Opl. Res. Q., 16, 1965, 329.
3. J. Evensmo : Simula, O.R. 75, Proceedings of the 7th I.C on O.R., 1975, 213.
4. D. Eliisson : General Discrete Digital Simulation Languages, Continuous Simulation Languages, Combined Simulation Languages, Centre in Simulation, University of Lancaster, 1979.
5. R.W. Conway : Some Tactical Problems in Digital Simulation, Mgnt. Sci., 10, 1963, 47.
6. R. Spinelli deCarvahlo and J.G. Crookes : Cellular Simulation, Opl. Res. Q. 27, 1976, 31.
7. R. Spinelli de Carvahlo and J.G. Crookes : XLSIM - 1, A System for Experimentation with Cellular Simulation Models-Mark 1, Department of Operational Research, University of Lancaster, 1975.

8. G. H. Papadopoulos and J.G. Crookes : RCSP - Rare Events Cellular Simulation Programme, Department of Operational Research, University of Lancaster, 1980.
9. G.H. Papadopoulos : The Simulation of Rare Events, Ph. D. Thesis, Department of Operational Research, University of Lancaster, 1980.